

УДК 551.510.535

Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околоземном космосе в свете проекта «Попередження»

Л. Ф. Черногор

Харківський державний університет

Надійшла до редакції 23.07.98

В світлі проекту «Попередження» розглядається енергетика сонячних процесів, магнітосфери, іоносфери, атмосфери та Землі. Обчислена енергія (потужність) основних процесів та явищ, що можуть заважати виявленню передвісників землетрусів в навколоземному просторі. Хоча енергетика передвісників землетрусів звичайно набагато менша енергетики заважаючих факторів, перша є достатньо вагомою, щоб ставити та розв'язувати задачу селекції передвісників за спостереженнями варіацій параметрів навколоземного простору. Описані труднощі, що виникають при пошуку передвісників за варіаціями параметрів іоносфери та магнітосфери.

ВВЕДЕНИЕ

Предупреждение о землетрясениях — важная и сложная научно-техническая задача. Сейсмологи пытаются ее решить в течение многих десятков лет. Новые возможности в предсказании землетрясений (ЗТ) открылись после обнаружения эффектов предвестников в ионосфере и магнитосфере [2, 7]. Этому посвящается проект «Попередження».

Поиск предвестников землетрясений в вариациях параметров ионосферы и магнитосферы наталкивается на серьезные трудности. К ним относятся следующие.

Во-первых, плохо известно, что представляют собой эти предвестники. Если это изменение параметров плазмы и полей, то с какими пространственно-временными параметрами, какого знака, какой особенности.

Во-вторых, недостаточно изучены механизмы возникновения эффектов предвестников ЗТ в околоземном пространстве. Ясно одно, что они являются вторичными («третичными» и т. д.) по отно-

шению к процессам в литосфере. Это означает, что переносчик информации о готовящихся ЗТ претерпевает многократные и трудно учитываемые преобразования.

В-третьих, следует ожидать, что возмущения в околоземной среде, обусловленные предвестником, относительно невелики и обладают небольшой энергетикой, что осложняет их обнаружение.

В-четвертых, в атмосфере, ионосфере и магнитосфере постоянно наблюдаются вариации их параметров, связанные с воздействием на среду естественных и антропогенных факторов. Принципиально эти вариации ничем не отличаются от возмущений, обусловленных предвестниками ЗТ. Более того, энергетика последних обычно уступает энергетике процессов, маскирующих возможные предвестники. Эти вопросы обсуждаются в данной работе.

Целью статьи является оценка и сравнение энергетических характеристик предвестников ЗТ и основных процессов, затрудняющих обнаружение эффектов от готовящегося сейсмического события. Перечень важнейших источников энерговыделения

естественного и искусственного происхождения приведен в наших работах [3, 12].

ЭНЕРГЕТИКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Солнце — основной источник энергии на Земле. Полная мощность P_s его излучения составляет около $4 \cdot 10^{26}$ Вт [11]. Примерно $4 \cdot 10^{17}$ Вт «перехватывается» нашей планетой. Этой величине P_s соответствует поток $1.4 \cdot 10^3$ Вт/м². Большая часть P_s приходится на оптический диапазон (в невозмущенных условиях около $3 \cdot 10^{17}$ Вт), а на УФ-диапазон — $4 \cdot 10^{16}$ Вт. Лишь около 10^{-4} части последней затрачивается на ионизацию атмосферы. Мощность рентгеновского излучения порядка 10^6 Вт; этого достаточно для обеспечения ионизации основания ионосферы (здесь в дневное время концентрация электронов $N \sim 10^8$ м⁻³).

Кроме электромагнитного излучения, от Солнца исходит солнечный ветер, представляющий собой поток плазмы с замороженным в нее магнитным полем. В невозмущенных условиях $N \approx 5 \cdot 10^6$ м⁻³, скорость частиц $v \approx 3 \cdot 10^5$ м/с. Ветер имеет мощность

$$P_{sw} = Nv\epsilon_p S_m,$$

где $\epsilon_p \approx 10^{-16}$ Дж — энергия протонов, $S_m \approx 2 \cdot 10^{16}$ м² — площадь сечения магнитосферы с характерным размером около $10 R_e$ (R_e — радиус Земли). Оценки дают $P_{sw} \approx 10^{12}$ Вт.

Важными для физики околоземного космоса и проекта «Попередження» являются, в частности, нестационарные процессы на Солнце. Они вызываются вспышками — самыми мощными проявлениями солнечной активности. Их энергия достигает

Таблица 1. Энергетические характеристики составляющих солнечной вспышки у орбиты Земли

Переносчик	Энергия, Дж	Мощность, Вт
Излучение¹		
мягкое рентгеновское и ультрафиолетовое	$(3-5) \cdot 10^{15}$	$(3-5) \cdot 10^{12}$
оптическое	$(1-3) \cdot 10^{15}$	$(1-3) \cdot 10^{12}$
жесткое рентгеновское	$(3-5) \cdot 10^{10}$	$(3-5) \cdot 10^7$
гамма	$(1-3) \cdot 10^9$	$(1-3) \cdot 10^6$
радио	10^8	10^5
Корпускулы²		
электроны ($\epsilon_e \geq 20$ кэВ)	$(3-5) \cdot 10^{17}$	$(3-5) \cdot 10^{14}$
протоны ($\epsilon_p \geq 20$ МэВ)	$(1-3) \cdot 10^{17}$	$(1-3) \cdot 10^{14}$
Межпланетные выбросы и ударные волны ²	$(1-3) \cdot 10^{18}$	10^{15}

¹соответствует S_e
²соответствует S_m

10^{25} Дж, а мощность — 10^{22} Вт. На орбите Земли им соответствуют значения порядка 10^{16} Дж, 10^{13} Вт (для площади сечения Земли $S_e \approx 2 \cdot 10^{14}$ м²) и 10^{18} Дж, 10^{15} Вт (для S_m). Составные этих энергетических характеристик для сильной вспышки приведены в табл. 1. Для слабой вспышки (или субвспышки) эти параметры на 2—3 порядка меньше.

В возмущенном солнечном ветре $N \approx 10^7$ м⁻³, $v \approx 10^6$ м/с, $\epsilon_p \approx 10^{-15}$ Дж. При этом $P_{sw} \approx 10^{14}$ Вт.

ЭНЕРГЕТИКА МАГНИТОСФЕРЫ

Энергетика магнитосферы определяется энергией, поступающей от Солнца, энергией магнитного и электрического полей, а также энергией тепловых и нетепловых частиц [6]. Рассмотрим это подробнее.

Энергия магнитного поля с индукцией у поверхности Земли $B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Тл дается соотношением

$$W_m = w_m V \approx w_m V_e = \frac{4}{3} \pi R_e^3 w_m,$$

где $w_m = B_0^2 / 2\mu_0$ — плотность энергии, μ_0 — магнитная постоянная, $V \approx V_e \approx 10^{21}$ м³ — объем Земли. Здесь учтено, что с расстоянием B_0 быстро убывает ($\propto 1/R^3$), поэтому вклад в полную энергию вносит объем $V \approx V_e$. Вычисления дают $W_m \approx 10^{18}$ Дж.

Тепловая энергия плазмы в магнитосфере равна

$$W_{tm} = \frac{3}{2} k(T_e + T_i) N V_m,$$

где T_e, T_i — температуры электронов и ионов, k — постоянная Больцмана, $V_m \approx 10^{24}$ м³ — объем магнитосферы. Для $N \approx 10^9$ м⁻³, $T_{e,i} \approx 10^3$ К имеем $W_{tm} \approx 4 \cdot 10^{13}$ Дж.

Энергия нетепловых частиц в магнитосфере для электронов и протонов порядка 10 кэВ и 10 МэВ соответственно. При $N = 10^4$ м⁻³ имеем для них полную энергию 10^{13} и 10^{16} Дж. В возмущенных условиях она увеличивается на два порядка.

В магнитосфере также есть относительно слабые электрические поля с напряженностью $E \sim 0.1$ —1 мВ/м. Им соответствует энергия

$$W_{em} = w_{em} V_m = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V_m,$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная. Оценки дают $W_{em} \sim 10^5$ — 10^7 Дж.

Вспышки на Солнце вызывают в магнитосфере магнитную бурю. При этом вариации B_0 достигают

$\Delta B \sim 5 \cdot 10^{-7}$ Тл. Энергия бури оценивается так:

$$W_{ms} \approx w_{ms} V_e = \frac{B_0 \Delta B}{\mu_0} V_e.$$

Для того же объема 10^{21} м³ имеем $W_{ms} \approx 2.5 \cdot 10^{16}$ Дж, и мощность бури $W_{ms}/\Delta t \approx (0.25—2.5) \cdot 10^{12}$ Вт (при ее продолжительности $\Delta t \approx 10^4—10^5$ с).

ЭНЕРГЕТИКА ИОНОСФЕРЫ

Энергетика ионосферы определяется энергией падающего солнечного излучения, тепловой энергией плазмы, динамикой ветров, ионосферными токами, параметрами высыпавшихся частиц и т. п. [1]. Рассмотрим эти процессы подробнее.

Тепловая энергия ионосферной плазмы

$$W_{ti} = \frac{3}{2} k(T_e + T_i) N V_i \approx 6\pi k(T_e + T_i) N R_e^2 \Delta z_i,$$

где $V_i = 4\pi R_e^2 \Delta z_i$ и $\Delta z_i \approx 400$ км — объем и толщина ионосферы соответственно. При $N \approx 10^{12}$ м⁻³, $T_e \approx T_i \approx 2 \cdot 10^3$ К имеем $W_{ti} \approx 10^{13}$ Дж.

Оценим энергетические характеристики терминатора при его прохождении в ионосфере. Поскольку N в дневное время на всех высотах существенно больше, чем в ночное время, то энергия, которую сообщает терминатор ионосферной плазме, примерно равна ее тепловой энергии в объеме

$$V_i \approx 2\pi R_e \Delta z \cdot L_i,$$

где $L_i \approx v_i \Delta t$ и Δz — горизонтальный и вертикальный размеры области терминатора, $v_i \approx 300—500$ м/с — его скорость движения. С учетом сказанного мощность и энергия, приносимые терминатором, равны

$$P_i = 3\pi k(T_e + T_i) N R_e \Delta z v_i, \quad W_i = P_i \Delta t.$$

Здесь параметры плазмы относятся к дневным условиям. Результаты оценок приведены в табл. 2.

При прохождении терминатора имеет место также скачок ионизации. Ему соответствуют мощность и энергия, даваемые выражениями

$$P_{ii} = \varepsilon_i N V_i / \Delta t = 2\pi \varepsilon_i N R_e \Delta z v_i,$$

$$W_{ii} = P_{ii} \Delta t,$$

где $\varepsilon_i \approx 10$ эВ — потенциал ионизации молекул воздуха. Значения P_{ii} и W_{ii} также приведены в табл. 2.

Для оценки энергетических характеристик атмосферного ветра на ионосферных высотах предпо-

Таблица 2. Энергетические характеристики терминатора в ионосфере

Область ионосферы	P_i , Вт	P_{ii} , Вт	Δt , с	W_i , Дж	W_{ii} , Дж
D	10^3	$2 \cdot 10^5$	10^2	10^5	$2 \cdot 10^7$
E	10^5	$2 \cdot 10^7$	10^2	10^7	$2 \cdot 10^9$
F	10^8	$4 \cdot 10^9$	10^3	10^{11}	$4 \cdot 10^{12}$

Таблица 3. Мощность атмосферного ветра на ионосферных высотах ($v_w = 100$ м/с)

Область ионосферы	z_0 , км	$\rho(z_0)$, кг/м ³	$H(z_0)$, км	P_w , Вт
D	60	10^{-4}	10	10^{13}
E	90	$3 \cdot 10^{-6}$	10	$3 \cdot 10^{11}$
F	120	10^{-7}	20	$2 \cdot 10^{10}$

ложим, что поток воздуха течет через поверхность $S_w = \pi R_e H(z_0)$, где $H(z_0)$ — приведенная высота нейтральной атмосферы на высоте z_0 . Тогда для мощности ветра имеем

$$P_w = \frac{1}{2} \rho(z_0) v_w^3 S_w, \quad (1)$$

где $\rho(z_0)$ — плотность атмосферы на высоте z_0 , которая убывает с высотой по экспоненциальному закону, $v_w \approx 100$ м/с — скорость ветра. Результаты оценки P_w приведены в табл. 3.

Значительной энергетикой обладают ионосферные токи, плотности которых в средних и высоких широтах равны

$$j_{ml} = e N v_w,$$

$$j_{hl} = e N \frac{[E B_0]}{B_0^2},$$

где $E \approx 50$ мВ/м — напряженность высокоширотного ионосферного электрического поля (в средних широтах $E \approx 1—5$ мВ/м). При $N = 10^{11}$ м⁻³ имеем $j_{ml} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ А/м², а $j_{hl} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ А/м². Для характерной площади $S = 2\pi R_e \Delta z_j$, где $\Delta z \approx 30$ км — толщина ионосферного слоя с плотностью тока $j_{ml} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ А/м², получаем силу тока $I = j_{ml} S \approx 2 \cdot 10^6$ А. При $E \approx 3$ мВ/м и расстоянии $R \approx \pi R_e \approx 2 \cdot 10^7$ м разность потенциалов $U \approx ER \approx 6 \cdot 10^7$ В. Таким значениям I и U соответствует мощность ионосферных токов $P_{ij} = UI \approx 10^{11}$ Вт.

В средних и особенно высоких широтах существенны высыпания частиц в атмосферу из магнитосферы. Их мощность можно оценить из соотношения

$$P_{pp} = 2\varepsilon_i \Delta z \Delta q_i S, \quad q_i = \alpha N^2,$$

Таблица 4. Параметры потоков частиц с энергией ε в невозмущенной ионосфере средних широт и возмущенной ионосфере высоких широт (в скобках). Длительность высыпаний $4 \cdot 10^4$ с

Высота, км	$N, \text{ м}^{-3}$	$\alpha, \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$	$q, \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$	$\varepsilon, \text{ МэВ}$	$S, \text{ м}^2$	$P, \text{ Вт}$	$W, \text{ Дж}$	Вид частиц
60	$3 \cdot 10^6 (10^{10})$	$10^{-11} (10^{-11})$	$10^2 (10^9)$	15	$10^{14} (10^{13})$	$10^3 (10^9)$	$4 \cdot 10^7 (4 \cdot 10^{13})$	Протоны
70	$3 \cdot 10^6 (3 \cdot 10^{10})$	$10^{-11} (3 \cdot 10^{-12})$	$10^2 (3 \cdot 10^9)$	8	$10^{14} (10^{13})$	$10^3 (3 \cdot 10^9)$	$4 \cdot 10^7 (1.2 \cdot 10^{14})$	Протоны
80	$3 \cdot 10^7 (10^{11})$	$10^{-11} (10^{-12})$	$10^4 (10^{10})$	0.1	$10^{14} (10^{13})$	$10^5 (10^{10})$	$4 \cdot 10^9 (4 \cdot 10^{14})$	Электроны
90	$3 \cdot 10^8 (3 \cdot 10^{11})$	$3 \cdot 10^{-12} (3 \cdot 10^{-13})$	$3 \cdot 10^5 (3 \cdot 10^{10})$	0.04	$10^{14} (10^{13})$	$3 \cdot 10^6 (3 \cdot 10^{10})$	$1.2 \cdot 10^{11} (1.2 \cdot 10^{15})$	Электроны

где Δq_i — изменение скорости ионизации q_i , α — эффективный коэффициент рекомбинации, S — площадь, где имеет место высыпание частиц, $\Delta z \approx 10$ км — толщина слоя, где возникает ионизация высыпающимися частицами, $\varepsilon_i \approx 35$ эВ — средняя энергия, затрачиваемая на один акт ионизации молекулы корпускулой. Результаты оценки P_{pp} приведены в табл. 4. При этом считалось, что другие механизмы ионизации малосущественны, поэтому $\Delta q_i = q_i$.

ЭНЕРГЕТИКА АТМОСФЕРЫ

Энергетика атмосферы определяется поступающей в нее энергией извне, оттоком энергии и процессами в среде [4, 8]. К ним относятся тепловое движение частиц, прохождение терминатора, ветры, крупномасштабная и мелкомасштабная турбулентность, атмосферное электричество, падение крупных космических тел и другие. Рассмотрим эти процессы подробнее.

Тепловая энергия атмосферы зависит от ее температуры T_a и объема V_a и равна

$$W_{\text{та}}(z_0) = C\rho V_a T_a = C\rho(z_0)S_e H(z_0)T_a(z_0),$$

где $C \approx 10^3$ Дж/(кг·К) — удельная теплоемкость газа, T — температура газа. Величина $W_{\text{та}}$ — порядка 10^{24} , 10^{23} , $8 \cdot 10^{20}$, $3 \cdot 10^{18}$ и $5 \cdot 10^{13}$ Дж для тропосферы, стратосферы, мезосферы, термосферы и экзосферы соответственно.

Прохождение терминатора приводит к изменению тепловой энергии на величину

$$\Delta W_{\text{та}}(z_0) = W_t(z_0) \left(\frac{\Delta N_n}{N_n} + \frac{\Delta T}{T} \right),$$

$$W_t(z_0) = 2\pi C\rho(z_0)T(z_0)R_e H(z_0)v_i \Delta t,$$

где ΔN_n — изменение концентрации нейтральных частиц N_n . На высотах $z \leq 100$ км $\Delta N_n \approx 0$, $\Delta T/T \approx 3 \cdot 10^{-2}$, в то же время для $z = 300 \dots 1000$ км имеем $\Delta N_n/N_n \approx 0.4 \dots 1.0$, $\Delta T/T \approx 0.4 \dots 0.5$. Поэтому

величина $\Delta W_{\text{та}}/W_t$ — порядка $3 \cdot 10^{-2}$ для тропосферы, стратосферы и мезосферы, около 0.1 для термосферы и до 1 для экзосферы. Энергии ΔW_t соответствует мощность атмосферного терминатора

$$P_t = 2\pi C\rho(z_0)T(z_0)R_e H(z_0)v_i \left(\frac{\Delta N_n}{N_n} + \frac{\Delta T}{T} \right).$$

Для тропосферы, стратосферы, мезосферы, термосферы и экзосферы P_t порядка 10^{18} , 10^{17} , 10^{15} , 10^{13} и 10^{10} Вт соответственно.

Мощность атмосферного ветра оценивается по формуле (1) и составляет величину около 10^{14} — 10^{15} Вт для тропосферы и стратосферы, где $v_w \approx 20$ — 40 м/с. Значение P_w для больших высот указано в табл. 3.

На энергетику атмосферы существенно влияют такие явления, как циклоны (антициклоны), струйные течения, ураганы (тайфуны), шквалы, смерчи (торнадо) и др.

Энергию циклона оценим по формуле

$$W = \frac{1}{2} I \omega^2 \approx \frac{\pi}{4} L_h^4 \rho(0) H(0) \omega^2, \quad (2)$$

где I — момент инерции циклона, L_h — горизонтальный размер (радиус) циклона (его вертикальный размер $L_v \approx H(0)$), $\omega \approx 10^{-4}$ с⁻¹ угловая скорость вращения газа в циклоне. Для $L_h \approx 1000$ км имеем $W \approx 10^{20}$ Дж, для глобального вихря с $L_h \approx 10000$ км $W \approx 10^{24}$ Дж. Энергию циклона (антициклона) также можно оценить, исходя из соотношения

$$W \approx \Delta p V \approx \pi \Delta p L_h^2 L_v, \quad (3)$$

где $\Delta p \approx \rho(0) \bar{v}^2 = \frac{1}{4} \rho(0) L_h^2 \omega^2$ — изменение давления в центре вихря, $\bar{v} = \frac{1}{2} L_h \omega$ — средняя скорость в вихре. Нетрудно видеть, что результаты расчетов по формулам (2), (3) близки между собой.

Соотношение (3) пригодно также для оценки энергий других мощных атмосферных процессов. Для вычисления энергетических характеристик струйных течений можно воспользоваться выраже-

Таблица 5. Параметры атмосферных процессов

Явление	L_H , км	L_V , км	Δp , гПа	Энергия, Дж	Мощность, Вт
Циклон (антициклон)	3000	10	50	10^{21}	10^{15}
Струйные течения	3000 (длина) 300 (ширина)	3	100	10^{19} — 10^{20}	10^{15} — 10^{16}
Ураган	500	10	100	10^{18}	10^{13}
Шквал	10	1	50	10^{15}	10^{12}
Торнадо	1	1	50	10^{13}	10^{10}
Пылевой смерч	0.01	1	10	10^8	10^6

Таблица 6. Характеристики турбулентности

Область атмосферы	ε_t , Вт/кг	$\rho(z_0)$, кг/м ³	P_t , Вт
Тропосфера	10^{-2}	1	$4 \cdot 10^{14}$
Стратосфера	10^{-3}	10^{-1}	$4 \cdot 10^{14}$
Мезосфера	1	10^{-3}	$4 \cdot 10^{15}$

Таблица 7. Энергетические характеристики космических тел в зависимости от их размеров d

Параметр	d, м							
	0.1	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
W, Дж	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}	10^{27}	10^{30}
Δt , с	1	1	1	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
P, Вт	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{21}	10^{24}	10^{27}	10^{30}	10^{33}

нием (1). Параметры атмосферных явлений приведены в табл. 5.

Энергетика атмосферной турбулентности зависит от удельной диссипируемой мощности ε_t и массы газа. Мощность турбулентности

$$P_t(z_0) \approx \varepsilon_t(z_0)\rho(z_0)V(z_0) \approx 4\pi\varepsilon_t(z_0)\rho(z_0)R_e^2H(z_0).$$

Результаты оценки энергетических характеристик турбулентности приведены в табл. 6.

Рассмотрим энергетику электрических процессов в атмосфере. Наблюдения показывают, что вблизи поверхности Земли существуют электрические поля с напряженностью $E_0 \approx 100 \pm 25$ В/м над материками и 135 ± 15 В/м над океаном. С увеличением высоты $E_0(z)$ убывает примерно по экспоненциальному закону с характерным масштабом $H_e \approx 2.5$ —4 км. Этим значениям E_0 и H_e соответствует разность потенциалов $U \approx E_0(0)H_e \approx (3-4) \cdot 10^5$ В и энергия геоэлектрического поля

$$W_e = \varepsilon_0 S_e U^2 / (2H_e).$$

Здесь $S_e \approx 5 \cdot 10^{14}$ м² — полная площадь поверхности Земли. Для указанных параметров имеем $W_e = 7 \cdot 10^{10}$ Дж.

Оценим далее энергетику линейной молнии по

формуле

$$W = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0 l},$$

где q — переносимый заряд, l — длина канала разряда. Для сильнейших молний $l \approx 4$ —5 км, $q \approx 10^2$ Кл, при этом $W \approx 10^{10}$ Дж. Так как длительность разряда $\Delta t \approx 1$ с, то мощность линейной молнии около 10^{10} Вт (для прямого разряда $\Delta t \approx 10^{-3}$ с, $P \approx 10^{13}$ Вт).

Добавим, что энергия и мощность средней шаровой молнии порядка 10^4 Дж и 10^3 Вт.

Рассмотрим далее энергетические характеристики космических тел, вторгающихся в атмосферу Земли. К ним относятся метеоры, астероиды и кометы. Их энергия зависит от начальной массы и скорости космического тела: $W = mv^2/2$. Результаты оценок W и P приведены в табл. 7.

При расчетах принималось, что средняя плотность вещества космического тела равна $\rho_b \approx 3 \cdot 10^3$ кг/м³, относительная скорость около 40 км/с. Кроме того, считалось, что при $d \leq 10$ м тело полностью тормозится в атмосфере, где и выделяется вся энергия за время $\Delta t \approx H/v\cos\alpha$ ($H \approx 10$ км — приведенная высота атмосферы, α — угол между вертикалью и траекторией тела). При $d > 10$ м основное энерговыделение происходит взрывообразно ($\Delta t \approx 10^{-3}$ с) при столкновении космического тела с планетой. Критическое значение d оценивается из формулы [5]

$$\rho(z) \approx \frac{2d\cos\alpha}{3C_x H} \rho_b.$$

При $\rho(0) = 1$ кг/м³, $C_x \approx 1$, $\cos\alpha = 1/2$ имеем $d \approx 10$ м.

ЭНЕРГЕТИКА ЗЕМЛИ

Энергетика Земли зависит от ее гравитационной W_g , тепловой W_t и кинетической W_k энергий [10]. Последняя определяется энергией движения Земли вокруг Солнца W_{k1} и энергией вращения вокруг собственной оси W_{k2} . Для вычисления этих энергий воспользуемся соотношениями

$$W_g = G \frac{M_e^2}{R_e},$$

$$W_t = C_e M_e T_e,$$

$$W_{k1} = \frac{1}{2} M_e v_e^2,$$

$$W_{k2} = \frac{1}{2} I_e \omega_e^2,$$

где G — гравитационная постоянная, $C_e \approx$

≈ 600 Дж/(кг·К) — средняя удельная теплоемкость Земли, $T_e \approx 3.7 \cdot 10^3$ К — ее средняя температура, $M_e \approx 6 \cdot 10^{24}$ кг и $I_e \approx 8 \cdot 10^{37}$ кг·м² — масса и момент инерции планеты, $v_e \approx 30$ км/с — орбитальная скорость Земли, $\omega_e \approx 6 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹ — ее угловая скорость вращения вокруг собственной оси. Вычисления дают $W_g \approx 4 \cdot 10^{32}$ Дж, $W_l \approx 10^{31}$ Дж, $W_{k1} \approx 3 \cdot 10^{33}$ Дж и $W_{k2} \approx 2 \cdot 10^{29}$ Дж.

Перейдем далее к оценке энергетики сейсмических процессов. Энергия землетрясения определяется плотностью сейсмической энергии w_s и объемом очага землетрясения V_{eq} [13]:

$$W_{eq} = w_s V_{eq}.$$

В среднем $w_s \approx 10^3$ Дж/м³, а для сильнейших землетрясений $V_{eq} \sim 10^{16}$ м³. При этом $W_{eq} \approx 10^{19}$ Дж. Им соответствует магнитуда около 10 единиц. В доисторические времена (об этом свидетельствуют разломы) могли иметь место ЗТ с $V_{eq} \approx 10^{18}$ м³ и $W_{eq} \approx 10^{21}$ Дж. Потенциальную сейсмическую и упругую энергии всей литосферы оценим, исходя из соотношений

$$W_{ls} = w_s S_1 h_1, \quad W_{le} = \frac{\sigma_1^2}{K} S_e h_1,$$

где $S_1 \approx 5 \cdot 10^{13}$ м² — площадь всех сейсмически активных районов Земли, $h_1 \approx 200$ км — толщина литосферы, $\sigma_1 = \rho_1 g h_1 \approx 5 \cdot 10^9$ м² — вертикальное напряжение в литосфере, ρ_1 — ее средняя плотность, $K \approx 10^{11}$ Н/м² — модуль всестороннего сжатия для земных пород, g — ускорение свободного падения. Вычисления приводят к значениям $W_{ls} \approx 10^{22}$ Дж, $W_{le} \approx 2.5 \cdot 10^{28}$ Дж.

Землетрясения, происходящие под водой Мирового океана, способны генерировать цунами, энергию которых оценим по формуле:

$$W_{ts} = \frac{1}{2} \rho g A_{ts}^2 S_{ts},$$

где ρ — плотность воды, A_{ts} — высота цунами, $S_{ts} \approx S_{eq}$ — площадь очага ЗТ. Для сильнейших цунами $S_{ts} \approx 10^{11}$ м², $A_{ts} \approx 10$ м, $W_{ts} \approx 5 \cdot 10^{16}$ Дж. К. п. д. преобразования энергии ЗТ в энергию цунами не превышает 1—10 %.

Кроме ЗТ, значительной энергетикой характеризуется вулканизм. Энергия вулкана в основном определяется его термальной энергией

$$W_{vt} = M_1 C T + M_2 C_m,$$

где M_1 — масса выброшенного материала, $C \approx 800$ Дж/(кг·К) и $T \approx 1700$ К — его удельная теплоемкость и температура, M_2 — масса лавы, $C_m \approx 4 \cdot 10^5$ Дж/кг — удельная теплота плавления.

Для мощнейших вулканов $M_1 \approx M_2 \approx 5 \cdot 10^{13}$ кг, $W_{vt} \approx 10^{20}$ Дж. Энергия акустической (ударной) волны при этом на 3—4 порядка меньше.

ЭНЕРГЕТИКА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ниже оценим энергетику акустического, электромагнитного, магнитного, электрического, оптического, радонового и плазменного предвестников землетрясений.

При оценке энергетики инфразвукового предвестника будем исходить из того, что акустические колебания генерируются вследствие перемещения со скоростью v литосферных плит массой M [13]. Тогда энергия инфразвуковых волн может быть вычислена по кинетической энергии

$$W_a = \eta_a \eta_s \frac{M v^2}{2},$$

где $\eta_s \approx (1-5) \cdot 10^{-2}$, $\eta_a \approx 10^{-2}$ — коэффициенты преобразования кинетической энергии в энергию сейсмических волн и энергии последних в энергию инфразвука. Расчеты показали [13], что при $v \geq 3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ м/с и $M \geq 2 \cdot 10^{19} - 2 \cdot 10^{13}$ кг $W_a \geq 10^6 - 10^{10}$ Дж.

Рассмотрим энергетику электромагнитного предвестника. Электромагнитные волны генерируются в очаге будущего ЗТ при сдавливании пород. При этом возникают электрические токи с плотностью $j \approx 10^{-3}$ А/м² в диапазоне частот $f \sim 1 - 10^6$ Гц [14]. Для мощности электрического тока имеем

$$P = \frac{j^2}{\sigma_g} V,$$

где $\sigma_g \approx 10^{-4}$ Ом⁻¹м⁻¹ — удельная проводимость в очаге объемом V . При $V \sim 10^{15}$ м³ имеем $P \approx 10^{13}$ Вт. Если характерное время генерации $\Delta t \approx 10^3$ с, то энергия электромагнитного предвестника порядка 10^{16} Дж. Считая спектр излучения близким к равномерному для полосы частот $\Delta f = 10^6$ МГц, имеем $P/\Delta f \approx 10^7$ Вт/Гц. Тогда мощность излучения в диапазонах $f \leq 10$; 10^4 и 10^6 Гц порядка 10^8 ; 10^{11} и 10^{13} Вт соответственно. Именно в этих диапазонах, именуемых УНЧ (полоса частот $\Delta f \approx 10$ Гц), ОНЧ ($\Delta f \approx 10^4$ Гц), и ВЧ ($\Delta f \approx 10^6$ Гц), следует искать электромагнитные предвестники ЗТ. Следует добавить, что мощность этого излучения в атмосфере значительно меньше. Это связано с его ослаблением за счет скин-эффекта. Так, толщина скин-слоя для земных пород составляет около 10^2 , 1 и 0.1 км для $f = 1$, 10^4 и 10^6 Гц.

Таким образом, меньше всего ослабляется УНЧ-излучение. ВЧ-колебания могут генерироваться лишь при сжатии верхнего слоя толщиной $\Delta h \sim$

~ 0.1 км, мощность излучения при этом существенно меньше (10^{10} Вт). К. п. д. преобразования упругой энергии в энергию электромагнитного излучения равен

$$\eta = \frac{f^2 \Delta t}{\sigma_g w_s} = \frac{f^2 \Delta t}{\sigma_g} \cdot \frac{K}{\sigma_1^2}.$$

Для приведенных выше параметров имеем $\eta \sim 0.01-0.1$.

При оценке энергетики электрического предвестника следует учесть, что перед ЗТ напряженность геоэлектрического поля E может увеличиваться до 10^3 В/м в приземном слое толщиной $\Delta z \sim 1$ км. При этом энергия электрического поля

$$W_e = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \cdot S_{eq} \Delta z.$$

Для $S_{eq} \approx 10^{11}$ м² имеем $W_e \approx 10^9$ Дж. Если длительность процесса $\Delta t \sim 10^3-10^5$ с, то соответствующая мощность $P \approx 10^6-10^4$ Вт.

На границе ионосферы перед ЗТ, по-видимому, $E = 1-10$ В/м (в естественных условиях обычно значительно меньше). При этом $W_e \sim 10^3-10^5$ Дж, $P_e \sim 1$ Вт.

Магнитный предвестник характеризуется флуктуациями индукции $\Delta B \sim 1-10$ нТл. Его энергия

$$W_m = \frac{B_0 \Delta B}{\mu_0} \cdot S_{eq} \Delta z,$$

где $\Delta z \approx S_{eq}^{1/2} \approx 10^5$ м — толщина слоя с возмущенным магнитным полем. Здесь и далее при оценке энергии магнитного эффекта учтено, что в приближении квазимагнитостатики ΔB пропорционально R^{-3} , где R — расстояние от источника, и поэтому объем с магнитным полем в основном определяется характерным масштабом источника, т. е. $S_{eq}^{1/2}$. Для $\Delta B \approx 10$ нТл и $S_{eq} \approx 10^{11}$ м² имеем $W_m \approx 1.5 \cdot 10^{10}$ Дж. При $\Delta t = 150$ с мощность $P_m \approx 10^8$ Вт.

Для наблюдения оптического предвестника удобной оказывается красная линия кислородной эмиссии на длине волны 630 нм. Это излучение возникает на высотах 270 ± 25 км. Величина вариаций его интенсивности $\Delta I \propto \Delta N$, где ΔN — флуктуации концентрации электронов, предшествующих ЗТ. Наблюдения показали [7], что перед ЗТ $\Delta I \sim 10-10^2$ Рэл $\approx 3 \cdot 10^{-8}-3 \cdot 10^{-7}$ Вт/м². Мощность оптического предвестника

$$P_{op} = \Delta I S_{eq}.$$

При $\Delta I = 30$ Рэл и $S_{eq} = 10^{11}$ м² имеем $P_{op} \approx 10^4$ Вт. Для $\Delta t \sim 10^4-10^5$ с его энергия $\sim 10^8-10^9$ Дж.

Предвестники ЗТ сопровождаются также вариациями

параметров плазмы на ионосферных высотах. Так, на высотах около 1000 км, где $N \approx 3 \cdot 10^{10}$ м⁻³, $\Delta N \approx 10^9$ м⁻³, длительность флуктуаций порядка 1 мин [2]. Такой же величины могут быть и относительные изменения температуры электронов $\Delta T_e/T_e = 0.01-0.1$. При этом изменение плотности тепловой энергии

$$\Delta w_t \approx 2kT_e \Delta N.$$

При горизонтальных размерах 100×1000 км² (большой — вдоль геомагнитного меридиана) и вертикальном размере $\Delta z \approx 1000$ км для приращения тепловой энергии плазмы имеем

$$\Delta W_t \approx \Delta w_t \Delta z.$$

Оценки дают $\Delta W_t \approx 10^6$ Дж, $\Delta P_t = \Delta W_t / \Delta t \approx 10^4$ Вт. При одновременном изменении N и T_e величины ΔW_t и ΔP_t примерно удваиваются.

Предвестники землетрясений могут быть связаны с усилением потока радона над областью готовящегося ЗТ. В естественных условиях радон приводит к скорости ионизации молекул воздуха $q_{i0} \approx 10^7$ м⁻³с⁻¹, перед ЗТ $q_i \leq 10^{10}$ м⁻³с⁻¹. Толщина непосредственно ионизируемого слоя воздуха не более 10 м. За счет турбулентной диффузии его толщина может существенно увеличиваться (до 10^3 м и более). Мощность такого предвестника

$$P_r = \varepsilon_i q_i S_{eq} \Delta z_t,$$

где $\Delta z_t = (D_t \Delta t)^{1/2}$ — толщина слоя воздуха с радонам, возникающая за время Δt в результате турбулентной диффузии с коэффициентом диффузии D_t . При $D_t = 10$ м²/с, $\Delta t = 10^5$ с имеем $\Delta z_t \approx 10^3$ м. Тогда для $S = 10^{11}$ м², $q_i = 10^{10}$ м⁻³с⁻¹ получаем $P_r = 5 \cdot 10^6$ Вт, $W_r = P_r \Delta t = 5 \cdot 10^{11}$ Дж.

ЭНЕРГЕТИКА АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В связи с увеличением энерговооруженности человечества, проведением испытаний новой мощной техники и постановкой так называемых активных экспериментов существенно увеличилась степень воздействия человека на литосферу, атмосферу, ионосферу и магнитосферу. Оказывается, что энергетические характеристики антропогенных процессов соизмеримы и даже могут существенно превосходить соответствующие характеристики естественных процессов [3, 4, 12]. Особенно это относится к удельным параметрам, поскольку антропогенные источники возмущений в средах являются локализованными.

Рассмотрим подробнее энергетику взрывов, стар-

тующих ракет и космических аппаратов (КА), падающих отработавших КА, инжекторов плазмы и пучков частиц, излучения мощных радиосистем и линий электропередач, МГД-генераторов и метеоронов.

Энерговыведение химических взрывов, используемых в промышленной деятельности и в научных исследованиях, обычно не превосходит $1 \text{ кТ} \approx 4 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$. При длительности взрыва 10^{-3} с им соответствует мощность $P \leq 4 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$.

Энерговыведение самого крупного ядерного взрыва, произведенного 30 октября 1961 г. в СССР, составила около $58 \text{ Мт} \approx 2.4 \cdot 10^{17} \text{ Дж}$, при $\Delta t = 10^{-7} \text{ с}$ мощность $P \approx 2 \cdot 10^{24} \text{ Вт}$. Имеется принципиальная возможность создания (например, в целях противоастероидной защиты Земли) изделия с $W \approx 1 \text{ Гт} \approx 4 \cdot 10^{18} \text{ Дж}$, $P \approx 4 \cdot 10^{25} \text{ Вт}$.

Что касается проводимых в настоящее время подземных (редко — наземных) ядерных взрывов, то их энерговыведение обычно не превышает $10\text{—}100 \text{ кТ} \approx 4 \cdot 10^{13}\text{—}4 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$.

После ядерных взрывов второе место по энергетике занимают стартующие ракеты. Их характеристики оценим по следующим соотношениям:

$$W = Qm, \quad P = Q \frac{dm}{dt}, \quad (4)$$

где $Q \approx 10^8 \text{ Дж/кг}$ — теплотворная способность ракетного топлива, m и dm/dt — его масса и расход. Для крупнейших ракет $M \approx 2 \cdot 10^6 \text{ кг}$, $dm/dt \approx 1.5 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$. При этом $W \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$, $P \approx 10^{12} \text{ Вт}$. Добавим, что для перспективных ракет эти параметры могут быть на порядок большими.

Важно отметить, что для корректирующих двигателей $dm/dt \approx 1\text{—}10 \text{ кг/с}$, $m \approx 10^3 \text{ кг}$, поэтому $W \approx 10^{11} \text{ Дж}$, $P \approx 10^8\text{—}10^9 \text{ Вт}$. Однако эти двигатели включаются непосредственно в околоземной плазме и производимые в ней возмущения могут быть значительно больше, чем при срабатывании основных (разгонных) двигателей в нижней атмосфере.

При падении отработавших КА их энергетика определяется кинетической энергией (массой) изделия. При $m = 10\text{—}100 \text{ т}$ и $v \approx 7.9 \text{ км/с}$ имеем $W \approx 3 \cdot 10^{11}\text{—}3 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$. Для $\Delta t \approx 10^3 \text{ с}$ мощность $P \approx 3 \cdot 10^8\text{—}3 \cdot 10^9 \text{ Вт}$. Для перспективных космических платформ $m = 10^3\text{—}10^4 \text{ т}$ и W , P на 1-2 порядка больше.

При проведении активных экспериментов применяется инжекция плазмы и пучков частиц. Плазма обычно образуется в результате ионизации солнечным излучением специальных веществ, выбрасываемых с борта КА взрывом. Энергия инжектируемо-

го вещества равна $W = mv^2/2$, где m , v — его масса и скорость. Для взрывных процессов максимальная скорость разлета вещества

$$v \approx \sqrt{2Q_e},$$

где $Q_e \approx 10^8 \text{ Дж/кг}$ — удельное энерговыведение химического взрыва. При этом $v \approx 3 \text{ км/с}$, для $m \approx 10^3 \text{ кг}$ имеем $W = 5 \cdot 10^9 \text{ Дж}$, $P \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ Вт}$.

При инжекции продуктов сгорания на активном участке траектории ракет $dm/dt \approx 10^4 \text{ кг/с}$, а значит мощность струи при ее скорости $v_j \approx 3 \text{ км/с}$ равна

$$P = v_j^2 \frac{dm}{dt} \approx 10^{11} \text{ Вт}.$$

Для $\Delta t \approx 10^3 \text{ с}$, $W \approx 10^{14} \text{ Дж}$.

Энергию и мощность инжектора пучков частиц можно оценить, исходя из следующих соотношений

$$W = \varepsilon \frac{I}{e} \tau, \quad P = \varepsilon \frac{I}{e},$$

где ε — энергия частиц, I — сила тока, e — заряд электрона, τ — длительность импульса. Например, при энергии электронов 100 кэВ , $I = 10^4 \text{ А}$, $\tau = 10^{-6} \text{ с}$ имеем $W_e = 10^3 \text{ Дж}$, $P_e = 10^9 \text{ Вт}$. При энергии протонов 10 МэВ $W_p = 10^5 \text{ Дж}$, $P_p = 10^{11} \text{ Вт}$.

Рассмотрим энергетiku излучения мощных радиосистем. Мощность радиопередающих устройств зависит от их частоты. Значения, близкие к предельным, приведены в табл. 8. Там же указаны коэффициенты усиления G и размеры антенных систем, близкие к предельно возможному. Разумеется, дальнейшее увеличение P может быть достигнуто синфазным излучением n -го количества передатчиков (реально $n \sim 10\text{—}100$).

Таблица 8. Параметры радиосистем, близкие к предельным

f, Гц	P, Вт	G	Режим излучения	Размер антенны, м
1	10^6	10^{-5}	непрерывный, импульсный	10^5
10	10^6	10^{-3}	непрерывный, импульсный	10^5
10^2	10^6	10^{-3}	непрерывный, импульсный	10^5
10^3	10^7	1	непрерывный, импульсный	10^4
10^4	10^7	1	непрерывный, импульсный	10^4
10^5	10^7	10	непрерывный, импульсный	3000×3000
10^6	10^7	10^2	непрерывный, импульсный	1000×1000
10^7	10^7	10^4	непрерывный, импульсный	1000×1000
10^8	10^8	10^6	импульсный	1000×1000
10^9	10^9	10^7	импульсный	300×300
10^{10}	10^{10}	10^8	импульсный	100×100
10^{11}	10^{11}	10^{10}	импульсный	100×100

Мощность электрического тока, передаваемая по линиям электропередач (ЛЭП) ~ 1 ГВт, длина линий $\sim 10^2\text{--}10^3$ км. Такие системы способны излучать на частотах 50 или 60 Гц и их гармониках. Доля излучаемой мощности не известна, однако можно предположить, что она не очень мала, так как еще с 1970-х гг. наблюдаются эффекты, по-видимому, связанные с изменением нагрузки в ЛЭП [9].

Другими источниками возмущений в ионосфере и магнитосфере могут служить МГД-генераторы. При силе тока I , характерном размере контура с током a амплитуда индукции магнитного поля на расстоянии r от контура (при $r^2 \gg a^2$) приблизительно равна

$$\Delta B \approx \frac{\mu_0 I a^2}{2r^3} \approx \frac{\mu_0 I S_r}{2r^3},$$

где S_r — площадь излучателя. Здесь учтено, что частота излучения $f \ll c/2\pi a$. Обычно $a \sim 10\text{--}100$ км и $f < 10^2\text{--}10^3$ Гц. Например при запитке Крымского полуострова ($S_r \approx 2.7 \cdot 10^{10}$ м²) для $I = 10^5$ А, $r = 100$ км имеем $\Delta B \approx 10^{-6}$ Тл, что составляет около 0.02 от невозмущенного геомагнитного поля. Возникает искусственная магнитная суббура. Ее энергия оценивается из соотношения

$$W \approx \frac{B_0 \Delta B}{\mu_0} V \approx \frac{B_0 \Delta B}{\mu_0} S_r \Delta z,$$

где $\Delta z \approx S_r^{1/2} \approx a$ — «толщина» возмущенной области. При этом $W \approx 10^{11}$ Дж.

Для воздействия на атмосферные процессы используются метеотроны, выбрасывающие мощные реактивные струи. Их энергетику можно вычислить также по формулам (4). Например, для $dm/dt = 10^4$ кг/с имеем $P \approx 10^{12}$ Вт. Система из 10—100 подобных метеотронов имеет мощность $10^{13}\text{--}10^{14}$ Вт и энергию до $10^{15}\text{--}10^{17}$ Дж (при $\Delta t = 10^2\text{--}10^3$ с).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные оценки показали, что многие естественные и антропогенные процессы обладают энергетикой, превышающей энергетику предвестников ЗТ. Это, однако, еще не свидетельствует о невозможности или нецелесообразности постановки и решения задачи об обнаружении предвестников достаточно сильных (с магнитудой, скажем, более 4—5 единиц) ЗТ по их атмосферно-ионосферно-магнитосферным проявлениям. Энергетические расчеты являются лишь первым этапом при оценке принципиальной наблюдаемости предвестников.

Далее необходимо сравнить удельные характеристики полезного сигнала предвестника и помех (мешающих факторов). К ним могут относиться энергия или мощность процесса, отнесенная к единице объема. Из-за локализации предвестников в пространстве и во времени их удельные характеристики относительно увеличиваются. Кроме того, необходимо учесть, что энергичный источник (например, циклон) не обязательно вызывает сильное возмущение в ионосфере или магнитосфере. И хотя, без сомнения, в системе Земля—околоземная среда (называемой иногда Геосферой, которая состоит из общеизвестных геосфер — литосферы, атмосферы, ионосферы, магнитосферы и др.) имеют место прямые и обратные связи, коэффициенты энергетических преобразований могут сильно отличаться в зависимости от природы источника энерговыделения, места и даже времени энерговыделения, состояния системы и подсистем. С другой стороны, система, а тем более подсистемы, являются открытыми и, поэтому, в них возможно срабатывание триггерных механизмов выделения энергии. Например, модуляция проводимости ионосферы в области токовой струи (~ 100 км) слабым источником приводит к значительным по своей энергетике вариациям ионосферных токов. Еще одним примером может быть такой. Стимулированное малоинтенсивным источником выпадение частиц из магнитосферы приводит к существенному изменению энергетики нижней ионосферы ($\sim 50\text{--}100$ км). Перечень проявлений триггерного механизма можно продолжить. Применительно к предвестникам ЗТ эти вопросы являются предметом дальнейших исследований. Пока же ясно одно — вариации параметров околоземной среды, вызванные предвестниками ЗТ и рядом мешающих факторов, принципиально мало чем различаются. Для обнаружения проявлений предвестников требуется тщательное изучение комплексом независимых методов вариаций параметров среды, обусловленных различными источниками, и составление их «портретов», а также математических моделей полезного сигнала и помехи. Только после этого можно формализовать задачу обнаружения и перейти к ее практическому решению.

ВЫВОДЫ

1. Оценены энергетические характеристики предвестников землетрясений в околоземной среде различной природы (акустической, электрической, магнитной, электромагнитной, оптической, плазменной и связанной с выходом радона).

2. Оценены энергетические характеристики процессов естественного и антропогенного происхождения, маскирующих обнаружение предвестников землетрясений.

3. Как и следовало ожидать, энергетика предвестников обычно уступает энергетике мешающих факторов. Однако это еще ничего не говорит об их относительном вкладе на входе устройства-обнаружителя предвестников, т. е. о величине входного значения «сигнал/помеха». Последнее требует отдельного рассмотрения.

4. В целом же энергетика предвестников землетрясений различной физической природы является весомой, что делает возможным и целесообразным решение задачи об их селекции на фоне мешающих факторов. Исследование в этом направлении должно вестись комплексно с использованием ряда наземных и орбитальных мониторов.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. Л. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
2. Бучаченко А. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А. и др. Ионосферные предвестники землетрясений // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 9.—С. 1023—1029.
3. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С. и др. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере // Вестн. Харьков. ун-та. Радиофизика и электроника.—1998.—№ 405.—С. 157—177.
4. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат, 1978.—456 с.
5. Клумов Б. А., Кондауров В. И., Конюхов А. В. и др. Столкновение кометы Шумейкер-Леви с Юпитером: Что мы увидим // Успехи физ. наук.—1994.—164, № 6.—С. 617—629.
6. Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. Количественный подход. — М.: Мир, 1987.—312 с.
7. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука,

1992.—304 с.

8. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1976.—640 с.
9. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. — М.: Наука, 1985.—224 с.
10. Стейси Ф. Физика Земли. — М.: Мир, 1972.—342 с.
11. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия, 1986.—783 с.
12. Черногор Л. Ф. Глобальные эффекты при локальном энерговыделении в Геосфере. Нетрадиционные научные идеи о природе и ее явлениях // Сб. докл. всесоюз. конф. — Гомель, 1990.—Т. 2.—С. 221—229.
13. Черногор Л. Ф. Инфразвуковое воздействие землетрясений и их предвестников на параметры околоземного пространства // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 4.—С. 463—472.
14. Molchanov O. A., Hayakawa M. Generation of ULF seismogenic electromagnetic emission: a natural consequence of microfracturing process. Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction. — Tokyo: TERRAPUB, 1994.—P. 537—563.

ENERGETICS OF THE PROCESSES OCCURRING ON THE EARTH, IN THE ATMOSPHERE AND NEAR-EARTH SPACE IN CONNECTION WITH THE PROJECT "EARLY WARNING"

L. F. Chernogor

In connection with the project "Early Warning", the energetics of the processes taking place on the Sun, in the Earth's magnetosphere, ionosphere, atmosphere, and on the Earth is examined. We estimate the energy (power) of the fundamental processes and principal phenomena which can prevent the precursors of earthquakes in the near-Earth space from being detected. Although the energetics of earthquake precursors is usually much lower than that of the geophysical background noise, the former is high enough, and this can be employed to formulate and solve the problem for detecting precursors by observing variations in the parameters of the near-Earth space. Problems arising while detecting precursors in variations of ionospheric parameters and in magnetospheric processes are described.